

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ MECHANIKY

Stabilita plachetnice a návrh sklopného kýlu

Sailboat Stability and Centerboard Design:

Student:

Pavel Skalný

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Rojíček Ph.D.

Datum odevzdání:

20.5 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Mgr. Pavel Skalný, Ph.D.**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Stabilita plachetnice a návrh sklopného kýlu
Sailboat Stability and Centreboard Design**
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

- 1/ Úvod do stability lodí.
- 2/ Technické specifikace analyzované plachetnice.
- 3/ Výpočet stability plachetnice.
- 4/ Návrh sklopného kýlu s ohledem na stabilitu a pevnost.
- 5/ Rozbor bezpečnosti plachetnice.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Brendlinger, M.: Sailboat Stabilization System. Worchester, 2014.
- [2] Grygar, P.: Stabilita plavidla proti převržení. VŠB-TUO, Ostrava, 2010.
- [3] Royal Yacht Association: Stability and Buoyancy, London, 2009.
- [4] Vocilka, J. Pravidla pro klasifikaci a stavbu plavidel vnitrozemské plavby. Český lodní a průmyslový registr. Praha, 1995.
- [5] ČSN EN ISO 12217-2 Malá plavidla - Posuzování a kategorizace podle stability a plovatelnosti - Část 2: Plachetnice o délce trupu 6 m a větší. Praha, 2016.
- [6] Lenert, J.: Úvod do metody konečných prvků, VŠB – TU Ostrava, 1999.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- беру на ве́домі, же Высoкá школа ба́ньскá – Техни́кá универзита Ostrava (дále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3);

- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на ве́домі, же odevздáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

Podpis

Jméno a příjmení studenta:

Pavel Skalný

Adresa trvalého pobytu studenta:

U soudu 6198/31

708 00 Ostrava – Poruba

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Skalný, P.: Stabilita plachetnice a návrh sklopného kýlu: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2019, 53 s. Vedoucí práce: Ing. Rojíček, J., Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá stabilitou plachetnice Cape Cutter 19. K určení stability lodě byl vytvořen vlastní skript v programu matlab, který byl následně aplikován na množinu bodů reprezentující lodní trup. Po určení stability plachetnice bylo možné navrhnout několik variant pevného kýlu a analyzovat změněnou stabilitu plachetnice. Vedle křivky vykreslující stabilizující moment vzhledem k úhlu natočení, byla určena i práce nutná k převrácení plachetnice. Tato práce byla porovnána s prací konanou stabilizujícím momentem. Na základě tohoto srovnání byla určena maximální síla větru pro různé velikosti plachet. V další části práce byla mimo jiné realizována pevnostní analýza sklopné ploutve. Namísto původního návrhu, který počítal s ocelovým plechem byla ploutev navržena z hliníkového materiálu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Skalný, P.: Sailboat stability and centerboard design: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2019, 53 p.

Thesis supervisor: Ing. Rojíček, J., Ph.D.

Bachelor thesis deals with the stability of the Cape Cutter 19 sailboat. New scripts in matlab were created to determine the sailboat stability curve. The program was applied on the set of points representing the hull. The stability curve describes the relation between heel angle and stabilizing moment. After that, alternative keel variants were designed and analyzed from the point of view of stability. Apart of the stability curve, work required to overturn the sailboat was computed. This work was compared with the work produced by stabilizing moment. After that it was possible to calculate the maximum wind speed for different sized sails. Further it was realized the stress analysis of the centerboard. New centerboard was designed from aluminum.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce. Ing. Jaroslavu Rojíčkovi, Ph.D. za odborné vedení a věcné rady při psaní této práce.

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 2 |
| 1. Současné trendy u výpočtu lodní stability | 3 |
| 2. Technický popis analyzované plachetnice..... | 4 |
| 3. Fyzikální popis pohybu plachetnice..... | 6 |
| 4. Stabilita lodí | 9 |
| 4.1 Výpočet stability u kruhového průřezu..... | 11 |
| 4.2 Výpočet stability u nepravidelného průřezu | 12 |
| 4.3 Algoritmus výpočtu lodní stability | 13 |
| 4.4 Výpočet stability cc19..... | 15 |
| 4.2 Dynamická stabilita | 21 |
| 5. Rozbor bezpečnosti plachetnice..... | 26 |
| 6. Dimenzování sklopné ploutve..... | 27 |
| 6.1 Stanovení tlaku na ploutev | 28 |
| 6.2 Dimenzování lodní ploutve..... | 33 |
| 6.2.2 Použitý materiál | 33 |
| 6.2.3 Diskretizace..... | 34 |
| 6.2.3 Zadání okrajových podmínek | 34 |
| 6.2.4 Určení napětí a deformací | 35 |
| 6.3 Úprava designu lodní ploutve | 38 |
| Závěr | 40 |
| Seznam použité literatury a zdrojů | 41 |
| Přílohy..... | 43 |

Úvod

Přestože dnešní doba nabízí široké možnosti, jak výpočetně ověřit vlastnosti navrhované plachetnice, stále dochází k občasným haváriím případně ztroskotáním plachetnic během plavby. Tyto havárie jsou často způsobeny tím, že některá z mechanických komponent nevydrží podmínky provozu. K poruchám jednotlivých komponent, které mohou vést až ke ztroskotání, dochází zpravidla za zhoršených povětrnostních podmínek, které mohou nastat především na otevřeném moři. Například v závodu Vendée Globe 2016-2017 (závod osamělých jachtařů kolem světa) muselo pro způsobené závady postupně odstoupit 11 z celkem 29 účastníků. Podle autora této práce usuzuje, že ani užitím počítačových simulací nelze zcela postihnout komplikovaný proces, ke kterému dochází za náročnějších podmínek.

Cílem této práce je popsat stabilitu plachetnice „Cape Cutter 19“ od lodního designéra Dudleyho Dixe viz. [4]. Analýza plachetnice bude realizována, jak určením křivky stability, tak stanovením energií nutných k překlopení případně ke zpětnému otočení plachetnice. Dalším cílem bude vytvořit vlastní návrh sklopného kýlu (tzv. ploutve), tak aby nově navržená ploutev byla dostatečně pevná a lehká ale zároveň aby při jejím použití nedošlo k výrazné změně stability.

1. Současné trendy u výpočtu lodní stability

Ohodnocení bezpečnosti plachetnice je po technické stránce velmi náročná úloha. Na plachetnici zvláště při náročnějších podmínkách působí řada vlivů, mezi které patří dynamické působení větru a vln. Na menších lodích je velmi důležité vyvažování posádky, která svým pohybem zcela zásadně mění lodní stabilitu. Podle některých autorů hraje kvalita posádky zcela zásadní roli na bezpečnost plavby a jen přibližně 15 % ovlivňuje samotné konstrukční možnosti plavidla viz. [8]. Já osobně se s tímto tvrzením neztotožňuji a zastávám názor, že vůdce plavidla by měl plavbu případně rozhodnutí, jestli vůbec s plachetnicí vyplout, přizpůsobit technickým možnostem plavidla.

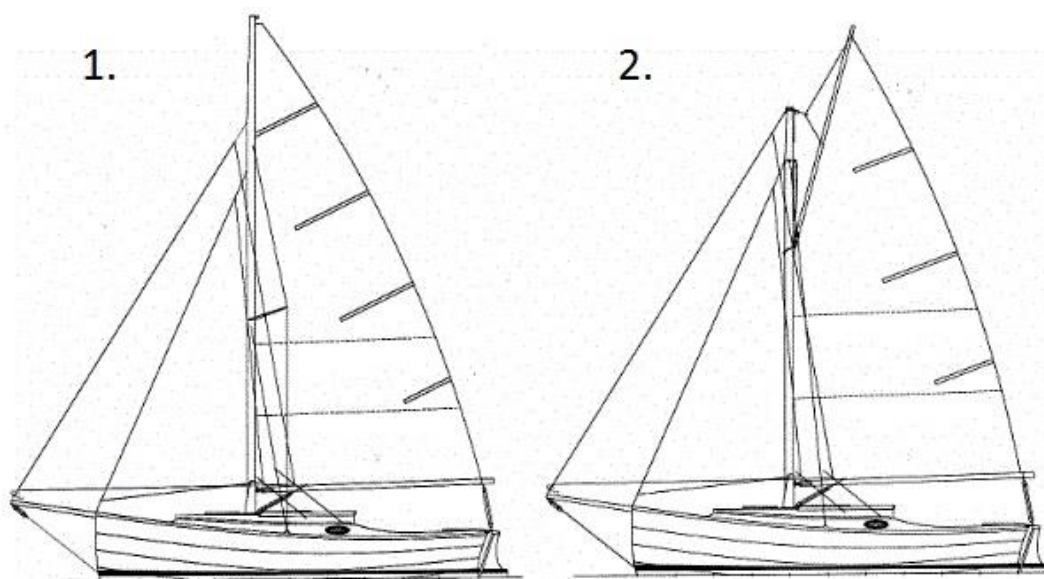
Nejpoužívanějším údajem podle kterého se určuje, k jakému účelu je plachetnice uzpůsobena je tzv. křivka stability [1,12]. V tomto případě se určuje silový moment vztlakové síly a tíhy lodě v závislosti na úhlu natočení. Podobně se používá i tzv. reedův diagram, kde se v závislosti na úhlu natočení určuje rameno stability – horizontální vzdálenost mezi působištem tíhové a vztlakové síly. Především křivka stability nabízí nejdůležitější informaci o charakteru plachetnice. Tato křivka bere ovšem v potaz pouze statické účinky působících sil. Při určování dynamické stability, se zpravidla plachetnice ohodnocuje řadou koeficientů, jako například poměr mezi plochou plachet a výtlakem, poměr mezi balastem (závažím) a objemem, poměr mezi výtlakem a délkou viz. [9] Všechny tyto koeficienty jsou provázené doporučenými intervaly, v jakých by se loď, té které kategorie mělo nacházet. Občasně je bezpečnost plachetnic popsána složitějšími matematickými modely, které zahrnují komplexní popis situace z hlediska dynamiky viz. [7,13].

2. Technický popis analyzované plachetnice

V této kapitole bude blíže představena analyzovaná plachetnice Cape Cutter 19 (dále cc19). Tato loď byla navržena lodním konstruktérem a jachtařem Duedlym Dixem. Koncept loď kombinuje tradiční anglické plachetnice z počátku 20. století a moderní konstrukci. Oplachtění je navrženo jak s tradičním ráhnovým (gáňlovým) oplachtěním, tak s moderním bermudským vysoko stěžňovým oplachtěním o celkové ploše plachet 23.5 m². Plachetnice je profesionálně vyráběna v Anglii, zároveň jsou však její plány poskytovány k amatérské konstrukci samotným D. Dixem. Profesionální výroba je realizována laminováním. Amatérská konstrukce počítá s překližkovou konstrukcí, která je v ohybech zpevněna laminováním. Koncept plachetnice cc19 byl D. Dixem přenesen i do dalších tří lodních návrhů s délkou loď od 6.4 m do 9.6 m.

Plachetnici lze svým zaměřením zařadit do lodní kategorie C – tedy loď vhodná na příbřežní nebo vnitrozemskou plavbu. K zabránění bočnímu snosu - driftu a zlepšení stability je v původním návrhu použita sklopná ploutev. Plachetnice má i bez pevného kýlu velmi dobrou lodní stabilitu (blíže v kapitole Výpočet stability). Kvalitu tohoto lodního designu prověřilo mimo jiné obeplutí Anglie v roce 2008, kdy především sever ostrova je po jachtařské stránce velmi náročný úsek.

Ke stabilitě lodi cc19 je využita lodní ploutev o hmotnosti 100 kg a olověné závaží umístěné na dně o celkové váze 280 Kg. Další vybrané technické specifikace jsou shrnuty v tabulce. Bližší informace lze najít na [49] a na stránkách lodního designu [2].



Obrázek 1 Oplachtění cc19: Varianty oplachtění cc19

1. Bermudské 2. Gáňlové oplachtění

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| Délka 5.8m | Dél. Vodorysky 5.5m | Šířka 2.2m | Ponor 0.45m |
| Výtlak 1100kg | Váha (light) 870 kg | Balast 380kg | Smáčená pl. 6.25 m2 |
| Hl. Plachta 13.3 m2 | Kosatka 5 m2 | Genua 10.2 m2 | Max. Plachty 23.5 m2 |

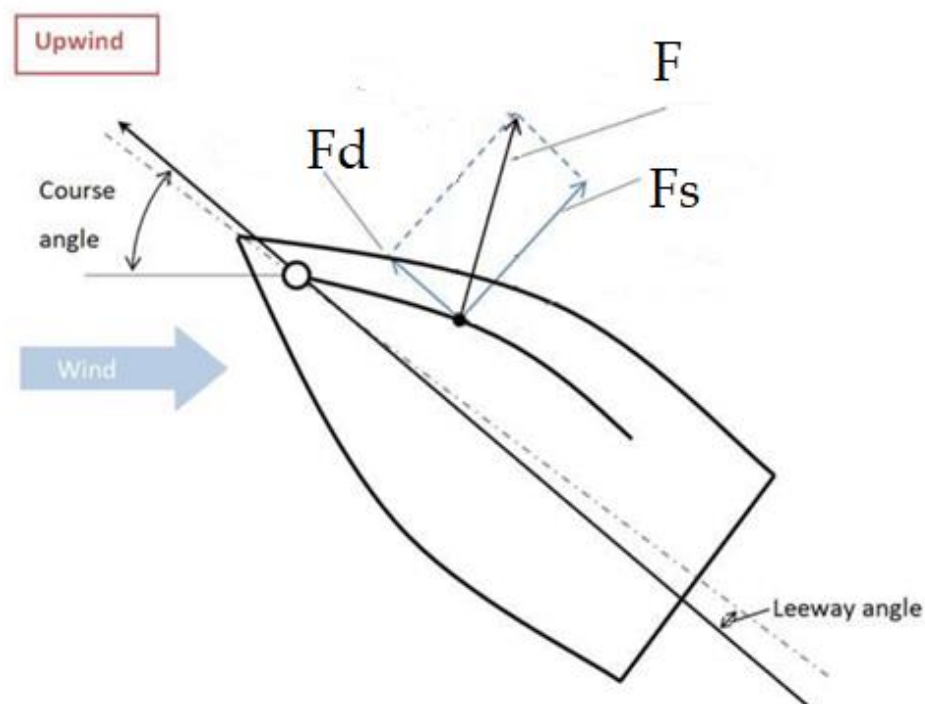
Tabulka 1 Technické parametry cc19

3. Fyzikální popis pohybu plachetnice

V této kapitole bude stručně popsán základní fyzikální princip pohybu plachetnice. V dalších odstavcích se pokusíme stanovit, jakou silou je za plavby namáhán lodní kýl, protože případná porucha kýlu (nebo podobně namáhaného kormidla) může mít fatální následky na průběh plavby. Popis principu plavby je zcela zásadní pro následný návrh a dimenzování vlastních variant kýlu.

Pohyb plachetnice lze vysvětlit jako výsledek vzájemného působení aerodynamiky plachet a hydrodynamiky lodního trupu. Samotnou lodní plachtu lze přirovnat k jednoduchému křídlu. Vítr musí urazit vzdálenost v prostoru před i za lodní plachtou (návětrná a závětrná strana) za stejný čas. Na závětrné straně (prostor „za plachtou“) musí však vzduch urazit delší trasu danou průhybem plachty. Rychlost proudění na závětrné straně je tedy větší, než na návětrné straně plachty. Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že zvýšení rychlosti způsobí snížení tlaku. Na pohybu plachetnice se podílí jak přetlak na návětrné straně, tak podtlak na straně závětrné. Tažná síla na plachtě je tvořena přibližně ze 2/3 sáním (které je způsobené podtlakem) a jen z 1/3 tlakem viz. [1]. Tyto síly působí v těžišti plachet a v případě správného nastavení jsou na plachtu kolmé. Tyto síly lze dále rozložit na dvě složky a to na složku pohybovou F_d , která působí ve směru osy lodě a na složku snosovou F_s , (viz. obrázek 1.), jež způsobuje naklání plachetnice a pohyb do boku (tzv. snos neboli drift).

Boční drift je pochopitelně pro pohyb plachetnice nežádoucí. V případě příliš velkého snosu by nebylo možné s plachetnicí křížovat proti větru. K omezení snosu slouží plocha kýlu nebo ploutve, která zvětšuje odpor lodi proti driftu. Snížení driftu způsobuje i hydrodynamická síla, která se vytváří během plavby. Při pohybu lodě proti vodě vzniká na kýlu hydrodynamická síla F_L , která má opačný směr k síle F_s . Její vznik lze vysvětlit na stejném principu jako vznik sil F_d a F_s . Síla F_L na jedné straně snižuje snos způsobený silou F_s , na druhé straně obě síly F_L a F_s působí jako moment silové dvojice a zapříčiňují náklon lodě.



Obrázek 2 Schématický popis pohybu plachetnice

Rychlost, případně síla větru, působí jinak na pohybující se předmět a jinak na předmět, který je v klidu. V tomto ohledu se rozlišuje mezi skutečným větrem a větrem zdánlivým. Síla a rychlost zdánlivého větru je ovlivněna skutečným větrem a pohybem plachetnice. Rychlost (a tedy i síla) zdánlivého větru, je vektorovým součtem rychlosti skutečného větru a vektoru opačného k vektoru rychlosti plachetnice. Teprve zdánlivý vítr způsobí vznik sil, popsanych výše.

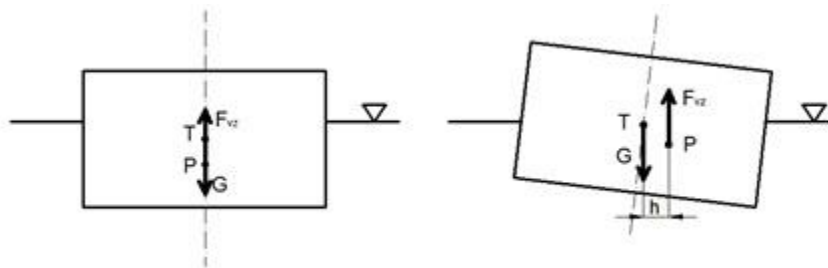
V dalších odstavcích budou popsány tři základní směry, kterými může plachetnice plout. Způsob plavby je samozřejmě ovlivněn především tím, jak je osa plachetnice natočena ke směru větru. Plachetnice pochopitelně nemůže plout přímo proti větru. Obvykle se udává, že maximální úhel, pod kterým je možné plout proti větru, je 45° . Pokud je loď orientována bokem ke skutečnému větru (přibližně 90° k ose lodi), můžeme hovořit o plavbě na boční vítr. V tomto případě má zdánlivý a skutečný vítr

různý směr. Díky sání může loď dosáhnout i vyšší rychlosti, než je skutečná rychlost větru. V případě, že je loď orientována zádi ke skutečnému větru (přibližně 180° k ose lodi), hovoříme o plavbě na zadní vítr. V tomto případě má zdánlivý a skutečný vítr stejný směr a jejich rychlost se liší pouze o rychlost plachetnice. V tomto případě je loď poháněna především tlakem větru. Plachetnice tedy při plavbě na zadní vítr nemůže překonat rychlost skutečného větru. Poslední z variant plavby, kterou zde zmíníme, je plavba plachetnice ostře proti skutečnému větru (nejméně 45° k ose lodi). Tento režim je po fyzikální stránce podobný s plavbou na boční vítr. Navíc však musí plachetnice překonávat i odpor větru, proti kterému se loď pohybuje.

Nejrychlejší je plavba na boční vítr (přesněji na zado-boční). Z pohledu stability lodi a dimenzování lodního kýlu nás bude zajímat především plavba na boční vítr a ostře proti větru. Důsledky plavby na zadní vítr, která může být za zhoršených podmínek velmi nebezpečná, nebudeme v této práci uvažovat.

4. Stabilita lodí

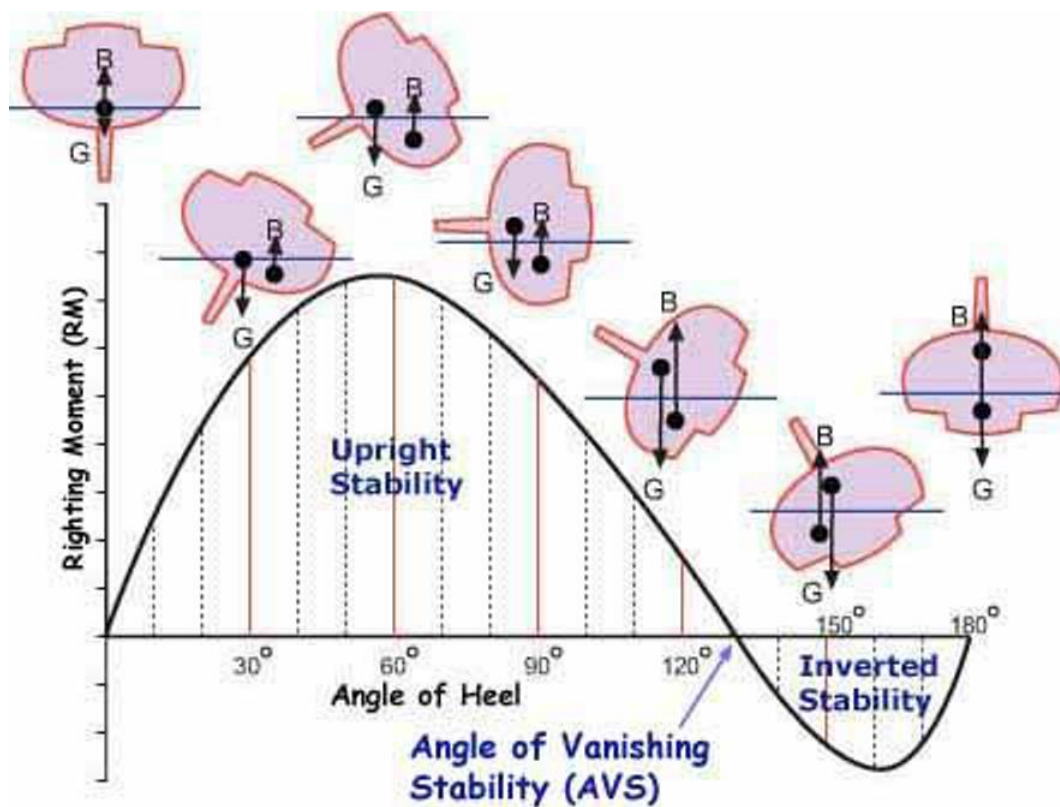
Stabilitu plavidla lze definovat jako „schopnost plavidla vrátit se do původní polohy, z níž bylo vychýleno vnějšími silami, přestanou-li tyto síly působit“ [10]. Na jakýkoli objekt ponořený do kapaliny působí vztlačková síla F_{vz} , která je přirozeně stejně velká jako tíhová síla G . Vztlačková síla působí v těžišti ponořeného objemu, tíhová síla působí v těžišti hmot. V případě, že je plavidlo nevychýlené, působí obě síly v jedné nositelce viz. Obrázek 3 (obrázek převzat z [5]). V případě, že dojde k naklonění plovoucího objektu, změní se i jeho ponořená část. To způsobí posunutí těžiště ponořené části a dojde ke změně působišť vztlačkové síly. V tomto případě F_{vz} , a G tvoří silovou dvojici s příslušným momentem, který působí proti momentu, jež zapříčinil náklon. Stabilita lodí, především plachetnic, patří mezi jednu z nejdůležitějších vlastností. Stabilita zásadně ovlivňuje bezpečnost a pohodlí za plavby a v podstatě určuje, jakým způsobem lze plavidlo užívat. U plachetnic, které se používají na vnitrozemských vodních plochách, lze akceptovat mnohem menší stabilitu, zatímco u plachetnic námořních je požadavek na vysokou stabilitu zcela zásadní.



Obrázek 3 Stabilita plovoucího objektu.

Stabilitu plavidla ovlivňuje geometrie lodního trupu, hmotnost plavidla, poloha jeho těžiště a geometrie plachet. K lepšímu porozumění lodní stability je nutné znát graf závislosti stabilizujícího momentu na úhlu natočení. Tento úhel určuje velikost vyrovnávacího momentu (vztlačková síla a tíhová síla) v závislosti na úhlu natočení

plavidla. Zatímco působí síly se nemění, působí síly vztlakové síly závisí na úhlu příčného naklonění plavidla. Stabilizující moment je maximální, pokud je horizontální vzdálenost mezi těžištěm a působí síly vztlakové síly maximální. Na obrázku (4) je maximální stabilizující moment při 60 stupních od vertikální osy. Tento úhel se v angličtině označuje jako „Angle of Maximum stability (AMS)“ Jakmile úhel natočení překročí tuto hodnotu, začne se stabilizující moment snižovat. Výrazem „Angle of Vanishing stability“ (AVS) se označuje úhel, po jehož překročení zůstane plachetnice přetočená dnem vzhůru. V tomto případě působí moment silové dvojice F_{vz} a G proti případnému otočení plavidla zpět.



Obrázek 4 Stabilita plovoucího objektu

Ke zvýšení lodní stability se využívá řada technických řešení, lze je rozdělit na pasivní a aktivní systémy. Aktivní systémy potřebují ke své činnosti vnější zdroj

energie, zatímco pasivní systémy se obvykle skládají z principiálně jednoduché mechanické soustavy. V této práci se budeme zabývat pouze využitím pasivních systémů, bližší informace o aktivních stabilizujících systémech lze najít například v práci Brendlingera [1].

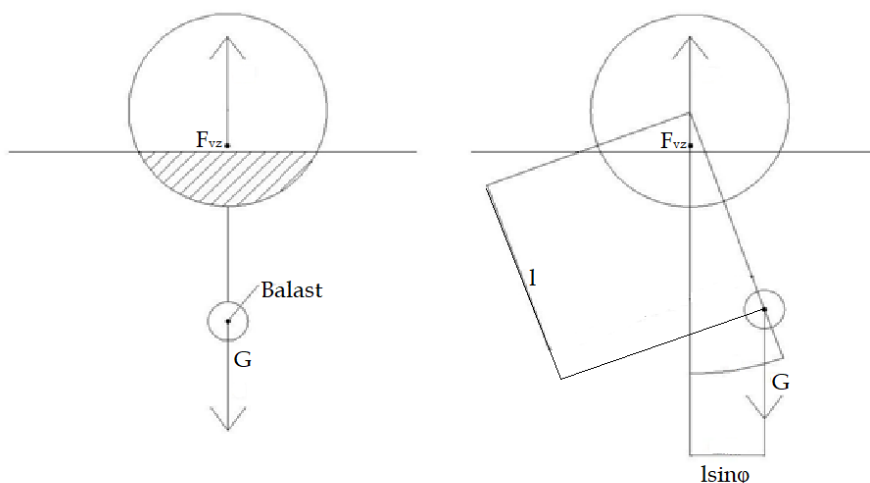
Mezi často používané pasivní stabilizující systémy patří u plachetnic lodní kýl, balast (závaží) a různé plováky. V případě plováků se využívá jejich stabilizující moment způsobený vztlakovou silou plováku a délkou ramene jeho nosníku. Princip plováků využívají i moderní katamarány (plavidlo se dvěma trupy) a trimarany (plavidlo se třemi trupy), které patří mezi nejrychlejší plavidla na světě. Zatímco plováky využívají ke stabilizaci vztlakovou sílu, lodní balast ke stabilizaci využívá hmotnost. Balastem lze rozumět závaží, které slouží ke zvýšení stability (případně ke správnému vyvážení plavidla). Pro tyto účely se používají především kovové materiály. V některých lodních designech se používá jako balast voda. V naší práci budeme rozlišovat dva typy provedení –pevný kýl a ploutev. V případě kýlových plachetnic se balast umísťuje v nejnižším místě kýlu, což výrazně zvětšuje stabilitu plavidla. V případě ploutvových (kýl se při přistání sklápí) plachetnic se balast zpravidla ukládá na dno lodi. Obecně mají ploutvové plachetnice vyšší počáteční stabilitu než plachetnice kýlové. V našich analýzách se budeme zabývat návrhem sklopné ploutve i pevného kýlu.

Při praktickém výpočtu stability budeme brát v potaz tvar plavidla a celkovém rozložení hmotnosti. Tvar ponořené části určuje polohu působíště vztlakové síly. Na polohu těžiště plavidla bude mít vliv, vedle samotného tvaru plavidla, rozložení hmotnosti trupu a balastu. V této práci nebudeme upravovat samotný tvar analyzovaných plachetnic, uvažovat budeme pouze o změně ploutve, kýlu a o případné změně rozložení balastu. Před výpočtem skutečných plavidel uvedeme několik příkladů, jak rozložení závaží-balastu ovlivňuje stabilitu. V následujících dvou příkladech bude demonstrováno, jak může změna balastu ovlivnit celkovou stabilitu plavidla.

4.1 Výpočet stability u kruhového průřezu

Těžiště pláště je v případě homogenního rozložení materiálu umístěno v ose válce. Uvažujme variantu, kde těžiště je uloženo na ose kruhu pod středem obvodové kružnice. Toho lze docílit závažím – balastem uloženým pod středem kružnice.

U plavidla kruhového průřezu platí, že tvar ponořené části zůstane po libovolném náklonu stejný. Pro válcové plavidlo lze jednoduše stanovit rameno stabilizačního momentu jako $\sin \varphi \cdot l$, kde l je vzdálenost těžiště od osy válce (podle které se válec otáčí),

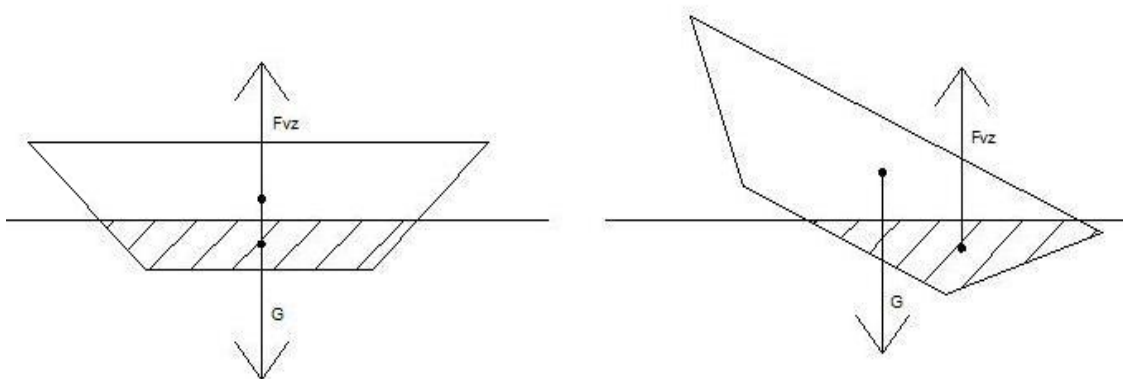


Obrázek 5 Stabilita u kruhového průřezu

4.2 Výpočet stability u nepravidelného průřezu

Další příklad, který uvedeme, je výpočet stability u hranolu lichoběžníkového průřezu. Tento tvar již lépe odpovídá skutečnému tvaru některých plachetnic. Oproti předchozímu případu se bude geometrie ponořené části měnit. Pro každý úhel

naklonění bude nutné určit polohu působíště vztlakové síly a její horizontální vzdálenost od těžiště lodi. Celý výpočet demonstrujeme na konkrétním případě. Budeme uvažovat hranol o lichoběžníkovém průřezu. V případě naklonění plavidla dojde ke změně ponořené části trupu s tím, že celková plocha (objem ponořené části), se nezmění. Stanovení křivky stability je v tomto případě mnohem komplikovanější. Pro její stanovení byl v programu Matlab vytvořen jednoduchý algoritmus, který popíšeme v následujícím odstavci.



Obrázek 6 Stabilizující moment u lichoběžníkového průřezu

4.3 Algoritmus výpočtu lodní stability

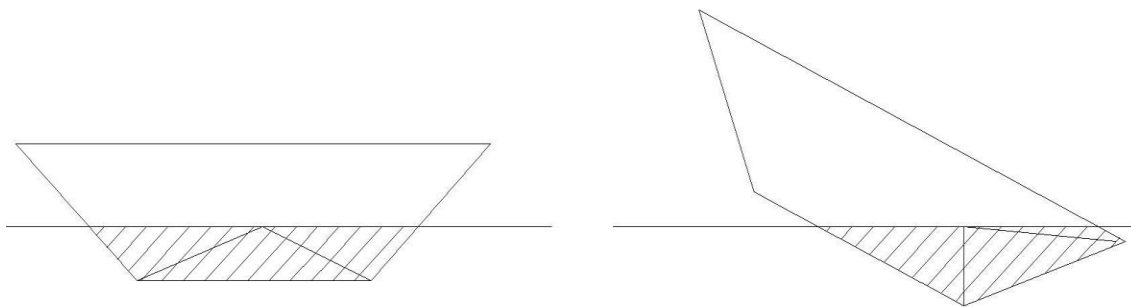
Algoritmus lze popsat v několika bodech, na vstupu algoritmu jsou údaje o průřezu plavidla, výšce vodorysky a úhlech, pro jaký chceme znát stabilizující moment. V našem případě jsme určovali stabilitu plavidla pro úhly o velikosti 1, 2, ..., 180 stupňů. Základní vlastnosti algoritmu lze popsat v těchto krocích:

1. Výpočet plochy ponořené části, označené jako S_1

2. Změna úhlu natočení plavidla
3. Určení obrysu a tvaru ponořené části, označené jako S_i
4. Pokud je S_i blízké S_l pokračujeme krokem 5, v opačném případě je hladina vodorysky změněna a vracíme se ke kroku 3.
5. Výpočet polohy těžiště ponořeného průřezu a výpočet velikosti silového momentu. Zaznamenání výsledku pro daný úhel. Přistoupení ke změně úhlu a přechod k bodu 2 nebo ukončení běhu algoritmu.

Výpočet plochy ponořené části

Výpočet plochy ponořené části byl v našem případě realizován specifickým způsobem. Ponořená část byla pokryta trojúhelníky, které měly jeden vrchol společný, další vrcholy korespondovaly s body vymezujícími ponořenou část trupu (obr. 7) Trojúhelníky byly zvoleny ze dvou důvodů: jejich využitím je možné určit přesný tvar ponořené část u šarpiových tvarů a lze u nich snadno určit jejich obsah a těžiště. Obsah trojúhelníků byl počítán jako polovina skalárního součinu dvou směrových vektorů. Tyto vektory byly určeny ze souřadnic dvou libovolných dvojic vrcholů trojúhelníka. Každý trojúhelník byl v algoritmu zadán souřadnicemi svých vrcholů.



Obrázek 7 Pokrytí ponořené části trojúhelníky

Změna úhlu natočení plavidla

Namísto natočení celého trupu bylo přikročeno ke změně natočení přímky symbolizující hladinu. Ta byla zadána ve směrnicovém tvaru $y = kx + q$, kde směrnice k lze počítat jako tangenta úhlu natočení. Pouze v případě natočení o 90 stupňů nelze využít směrnicového tvaru, na místo toho se pracovalo pouze se x -ovou souřadnicí přímky.

Změna plochy ponořené části

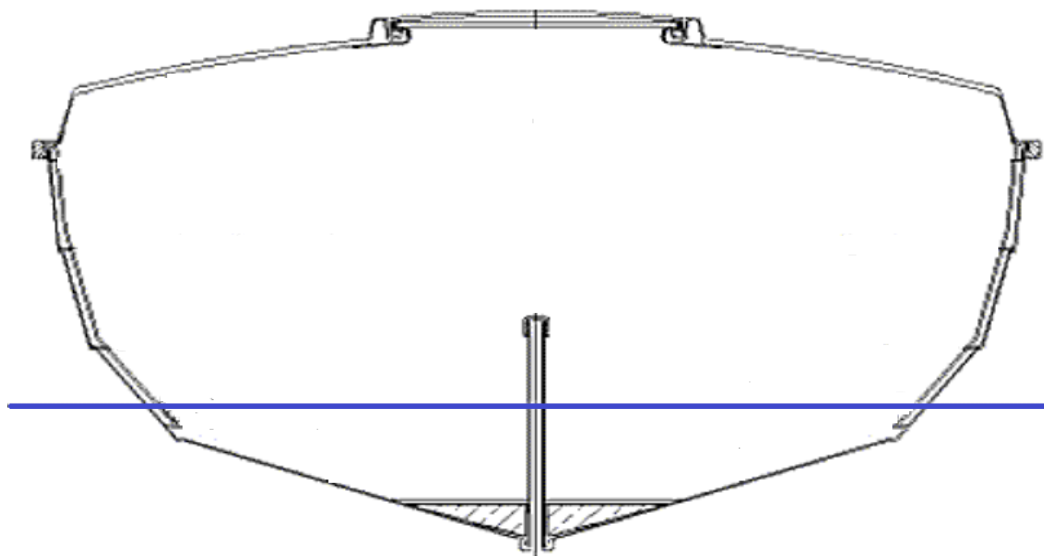
Změna plochy ponořené části byla realizována úpravou parametru q . Uvažujme, že by obsah ponořené části bylo nutné zvětšit o obsah S' . Parametr q byl zvětšen o hodnotu v , kterou je možné přibližně vyjádřit, jako S'/d , kde d je délka vodní hladiny v příčném řezu. Fakticky byl obsah S' aproximován obdélníkem o stranách délky d a S'/d .

4.4 Výpočet stability cc19

Algoritmus pro výpočet lodní stability, popsáný v předcházející kapitole bude nyní využit pro stanovení stabilizujícího momentu u cc19. Nejprve určíme klopný moment u klasické plachetnice, načež přejdeme ke stanovení stability pro různé varianty kýlu. Algoritmus popsáný dříve popisuje vlastnosti plošného tělesa. U kterého určuje umístění těžiště. Znalost těžiště na základě, kterého je možné určit dílčí vratný moment. Algoritmus

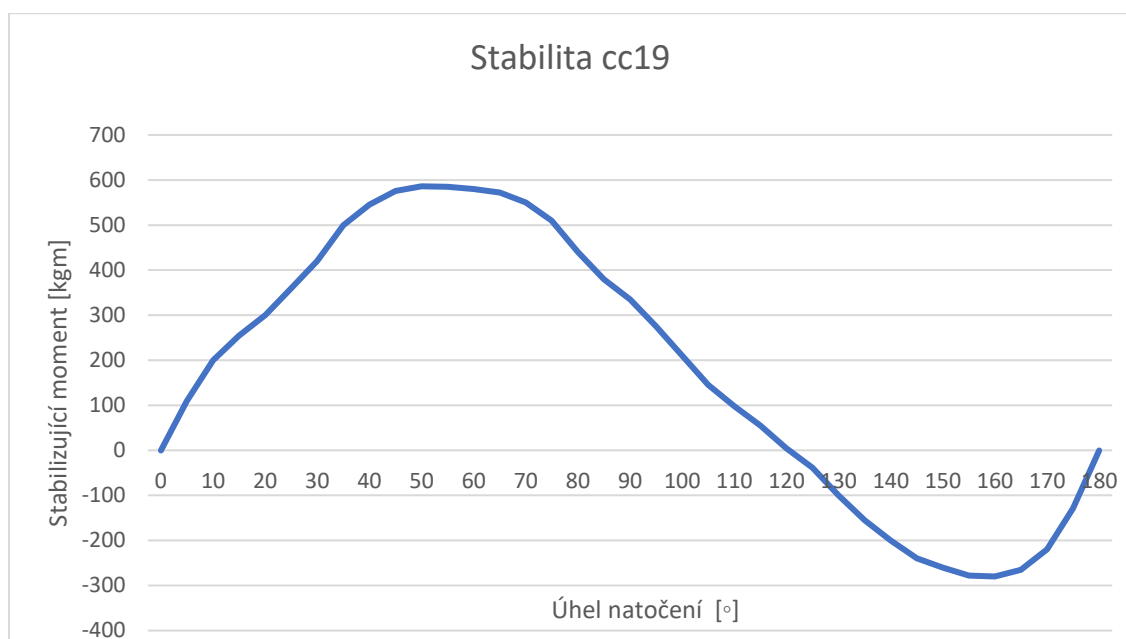
V této kapitole realizujeme vlastní výpočet stability plachetnice cc19. Výpočet provedeme pomocí algoritmu, který byl popsán v předcházející kapitole. Algoritmus určuje těžiště plochy příčného řezu, který koresponduje s ponořenou částí obrazce. V našem postupu byl trup loďe aproximován několika příčnými řezy, kdy pro každý

zvláště bylo určeno těžiště. Ukázka příčného řezu je na obr. V podstatě byl trup diskretizován hranoly s podstavou příčného řezu a vhodně zvolenou výškou. Ukázka příčného řezu - žebra je na obrázku 8. Tento postup principiálně odpovídá numerické integraci. V tabulce je určen objem ponořené části vzhledem ke zvolené výšce aproximujících hranolů. Pro další výpočty jsme přistoupili k diskretizaci o velikosti výšky 5 cm akceptujeme tím, že nepřesnost se bude pohybovat přibližně kolem dvou procent. V technické dokumentaci cc19 jsme měli k dispozici osm nákrešů lodních žebíř, další fiktivní žebra byla vztvořena užitím interpolačních funkcí z programu Matlab. Pomocí algoritmu jsme určili polohu těžiště ponořené části trupu lodě, následně byla určena horizontální vzdálenost těžiště. Poznamenejme, že klopný moment by se správně měl násobit tíhou a nikoliv pouze hmotností plavidla. Vzhledem k tomu, že se křivka stabilizujícího momentu běžně (včetně stability cc19) uvádí v nesprávných jednotkách [kgm] na místo [Nm], jsme tyto jednotky ponechali. Stabilizující moment jsme nakonec určili, jako:

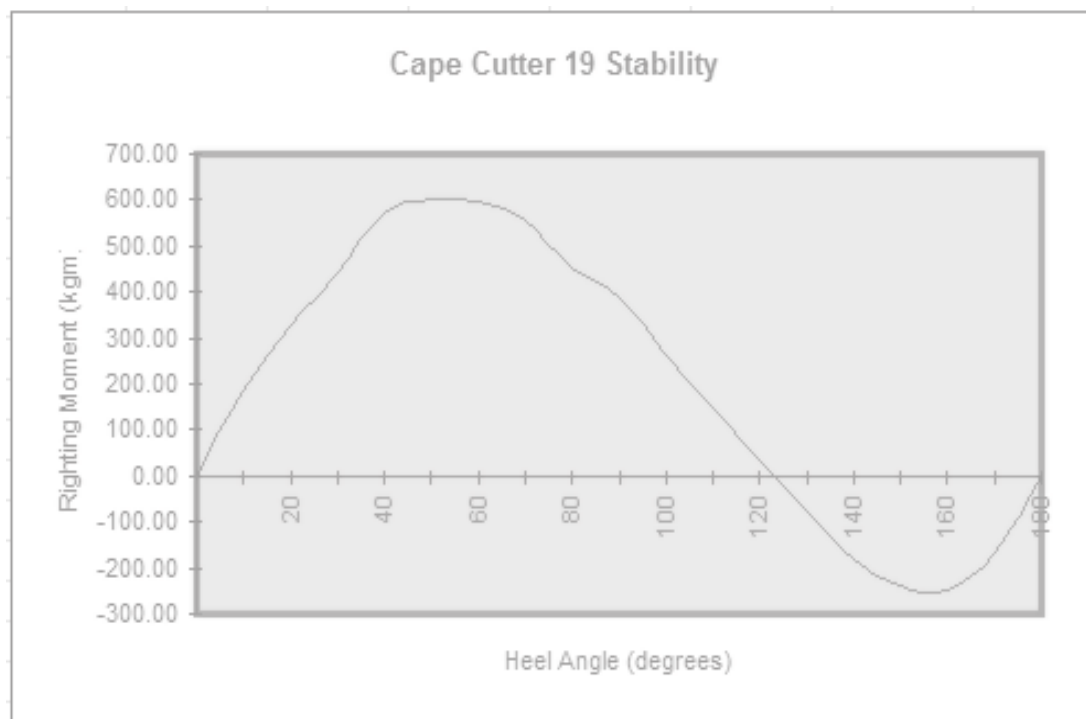


Obrázek 8 Ukázka příčného řezu plachetnice

Samotné výstupy algoritmu pro výpočet stabilizujícího momentu jsou graficky prezentovány na obrázku 9. Tento výsledek je v podstatě totožný se stabilitou proklamovanou projektantem prezentovaný na obrázku 10.



Obrázek 9 Stabilita plachetnice cc19 vlastní výpočet

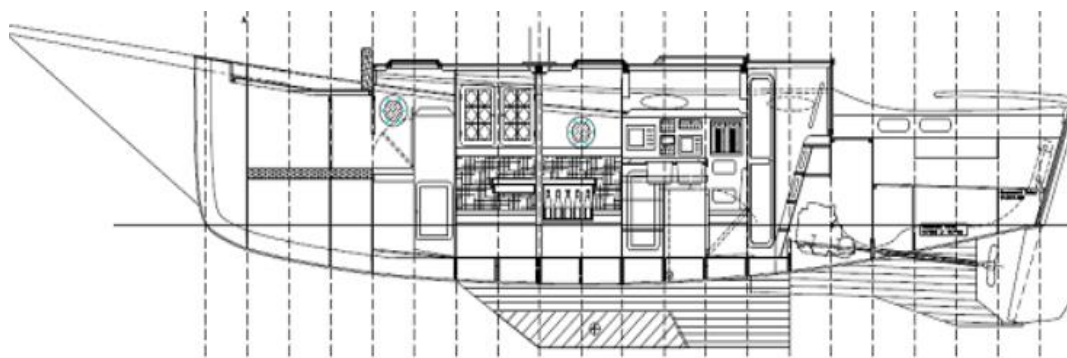


Obrázek 10 Stabilita plachetnice cc19 původní výpočet

| Výška hranolu [cm] | Vypočtený objem [m ³] | Odhadovaná nepřesnost v [%] |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 50 | 0.77 | 14 |
| 25 | 0.8 | 11 |
| 10 | 0.86 | 5 |
| 5 | 0.88 | 2 |
| 1 | 0.9 | 0 |

Tabulka 2 Nepřesnost výpočtu stability vzhledem k výšce aproximujícího hranolu.

Po určení křivky stability cc19 přistoupíme k návrhu jiných řešení kýlu a vliv na stabilitu lodi. Oproti původnímu návrhu, kde se počítalo se sklopnou ploutví otestujeme, jak velký vliv na stabilitu by měla varianta s pevným kýlem. U cc19 je veškerý balast -300 kg. Umístěn na dně lodi, tedy přibližně 0,4 m pod čarou ponoru. V našem návrhu uvažujeme toto závaží umístit na konec pevného kýlu, tak ať je docíleno větší stability. Na obrázku je zobrazen příklad provedení pevného kýlu. V této práci se nebudeme zabývat detailním návrhem pevného kýlu. Spokojíme se s tím, že by kýl byl umístěn se tak aby jeho těžiště bylo totožné s těžištěm sklopné ploutve z původního návrhu. Tím bychom zajistili, že by plachetnice zůstala optimálně vyvážená. Materiál samotného kýlu by byl zvolen z lehkého a pevného materiálu (například dřevo, hliník kompozitní materiál), tak aby pevnostně unesl závaží na svém konci. Možné provedení pevného kýlu je prezentováno na obrázku 10 Jedná se o zvětšenou variantu cc19 (cape charles 32) viz. [4].



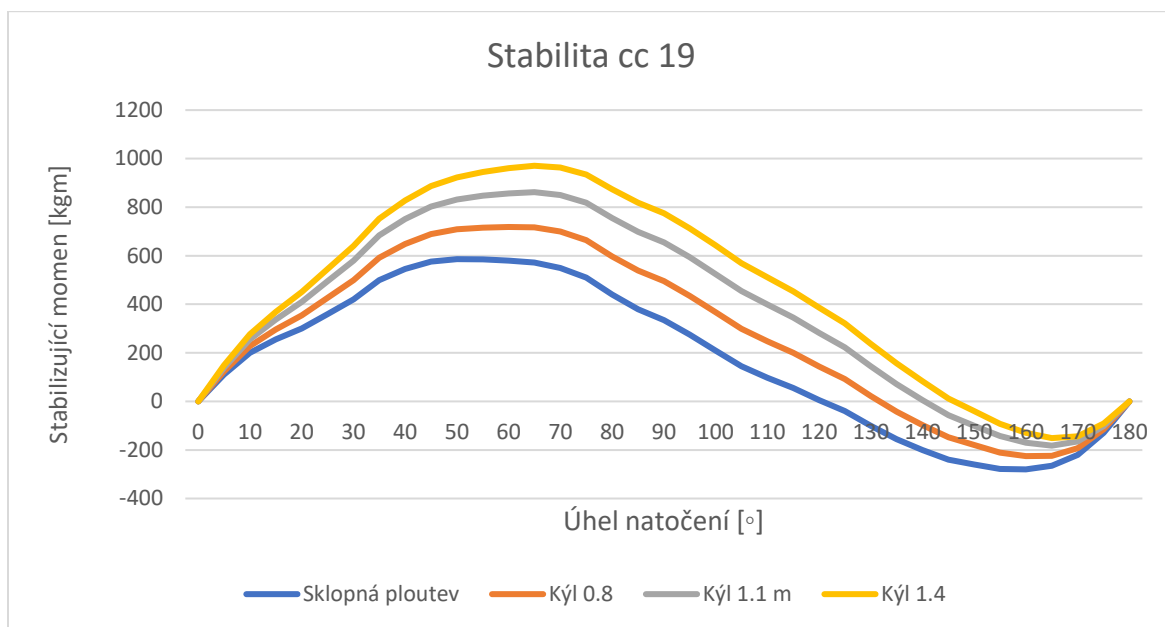
Obrázek 11 Možné řešení pevného kýlu

Výpočet stability byl proveden pro tři různé ponory 0,8 m, 1,1 a 1,4 m. Srovnání stability jednotlivých variant je prezentováno na obrázku 12. V tabulce 3 jsou prezentované důležité charakteristiky momentových charakteristik. Aritmetický průměr, medián a směrodatná odchylka byly prezentované pouze pro kladné hodnoty stabilizujících momentů. Nejdůležitější z hodnot v tabulce lze považovat hodnotu AVS (úhel pro který je stabilizující moment nulový). V tabulce 3 je také prezentována velikost energie nutné k dosažení AVS. Energii nutnou k převržení plavidla i energii nutnou ke zpětnému překlopení jsme spočítali, integrací klopného momentu, Tedy

$$E_k = G \int_0^{AVS} l(\varphi) d\varphi \quad (1)$$

Integraci jsme v tomto případě realizovali užitím lichoběžníkového pravidla délka intervalů na kterých jsme realizovali aproximaci byla zvolena jako 5 [°].

Na základě prezentovaných hodnot lodní stability, je podle mého názoru nejlepší původní návrh, který počítá se sklopným kýlem a pevný kýl s ponorem 1,1 m. Ponor 1.4 m je podle mého názoru pro loď do 6m poměrně velký a zvýšení stability již není oproti ponoru 1.1m natolik zásadní.



Obrázek 12 Stabilita cc19 pro různé provedení kýlu

| | ploutev | kýl 0,8 | kýl 1,1 | kýl 1,4 |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| průměr | 344 | 460 | 578 | 632 |
| medián | 360 | 495 | 594 | 643 |
| směr odch. | 295 | 277 | 290 | 312 |
| max | 586 | 603 | 664 | 756 |
| AVS [°] | 122 | 132 | 141 | 147 |
| Energie nutná k převržení [kJ] | 430 | 576 | 734 | 858 |

| | | | | |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|
| Změna vzhledem k pův. návrh v % | | 134 | 171 | 200 |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|

Tabulka 3 Charakteristiky stability pro různé provedení kýlu.

4.2 Dynamická stabilita

V této kapitole určíme dynamickou stabilitu cc19. Dynamickou stabilitu definujeme na základě práce, kterou vykonává stabilizující moment a klopný moment způsobený větrem. Inspirací k takovému postupu byla práce [5] Klopný moment, lze vyjádřit, jako

$$M_k = F_v \cdot h \cdot \cos(\varphi), \quad (2)$$

kde F_v je síla větru, h je vertikální výška těžiště plachet, φ je úhel natočení.

Síla větru se po zanedbání odporu určí, jako pak určuje, jako

$$\frac{1}{2} \rho_v v_v^2 S_v, \quad (3)$$

ρ_v je hustota vzduchu a v_v je okamžitá rychlost větru (vzduchu) a S_v je celková plocha plachet, na kterou vítr působí. Plocha plachet, na kterou působí vítr se mění v závislosti na otočení plavidla. Celková plocha, na kterou působí vítr bude násobkem původní plochy a $\cos(\varphi)$. Následně vyjádříme klopný moment, jako

$$M_k = \frac{1}{2} \rho_v v_v^2 S_v h \cos^2(\varphi) \quad (4)$$

Práce nutná k otočení lodě (Označíme jako A_k) se pak vypočítá integrací klopného momentu podle úhlu natočení φ . Tedy:

$$A_k = \int_0^u M_k d\varphi = \frac{1}{2} \rho_v S_v v_v^2 h \int_0^u \cos^2 \varphi d\varphi =$$

$$= \frac{1}{2} \rho_v S_v v_v^2 h \left[\frac{1}{2} \sin \varphi \cos \varphi + \frac{\varphi}{2} \right]_0^u. \quad (5)$$

Práci stabilizujícího a klopného momentu jsme určili integrací od 0 do $u = 90$

Plochu plachet i výšku těžiště jsme načetli z technické dokumentace plachetnice, tyto hodnoty pro různé varianty plachet jsou shrnuty v tabulce 4. Během plavby na boční vítr nebo na protivítr plachty nemohou být natočené kolmo proti větru, ale jsou vůči směru větru pootočené o přibližně 45 stupňů. Na základě tohoto faktu byla celková hodnota A_k podělena $\sqrt{2}$.

| | Plocha plachet [m2] | Pol. těžiště plachet [m] |
|----------------|---------------------|--------------------------|
| Plné plachty | 23.5 | 3.3 |
| 1.ref | 15 | 3.1 |
| 2.ref | 12 | 2.8 |
| Přední plachta | 5 | 2.7 |

Tabulka 4 Charakteristiky různých variant oplachtění cc19

Práci stabilizujícího momentu (označíme jako A_s) jsme obdobně určili integrací klopného momentu podle úhlu φ , jako:

$$A_s = \int_0^u M_s d\varphi = G \int_0^u l(\varphi) d\varphi \quad (3)$$

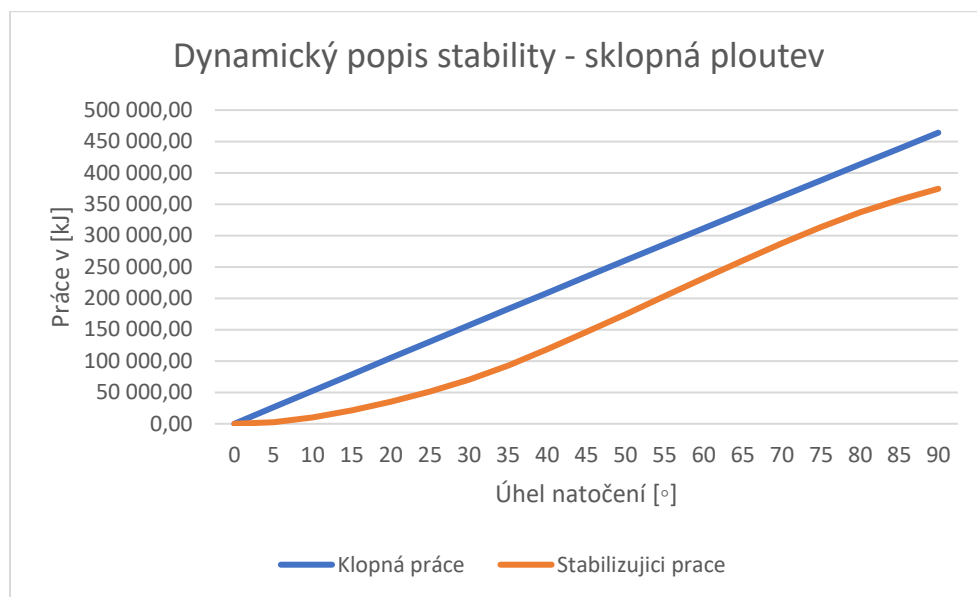
Srovnání obou prací je graficky prezentováno na obrázcích 13 až 15. V podstatě můžeme rozlišit tři varianty, klopná práce bude vždy větší než práce stabilizující a dojde k převrácení plachetnice viz. obrázek 13. Práce se pro nějaký úhel vyrovnají viz. 14. Za poslední variantu považujeme situaci, že síla působící na plachty je minimální a k náklonu v podstatě nedojde viz. obrázek 15.

Pro praktické využití plachetnice je velmi přínosné znát, vhodnou velikost plochy plachet pro zadanou rychlost větru, či opačně maximální přípustnou sílu větru pro zvolenou velikost plachet.

Maximální možnou rychlost pro zvolený úhel natočení u . lze vyjádřit, jako

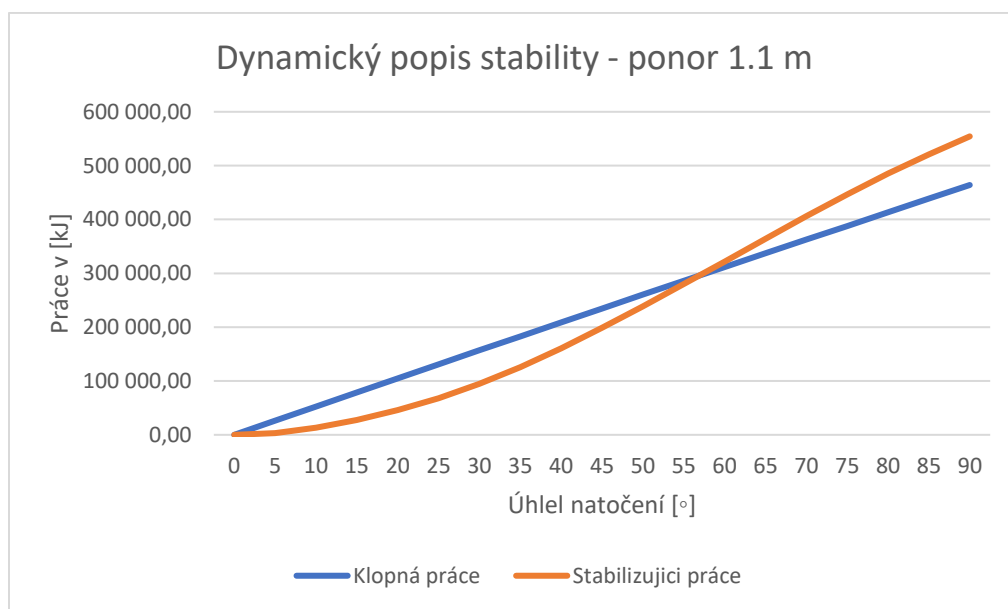
$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2G \int_0^u l(\varphi) d\varphi}{\rho_v S_v h \left(\frac{1}{2} \sin u \cdot \cos u + \frac{u}{2} \right)}} \quad (7)$$

Hodnoty v_{\max} pro různé úhly a pro různé plochy plachet jsou prezentované v tabulce 5.



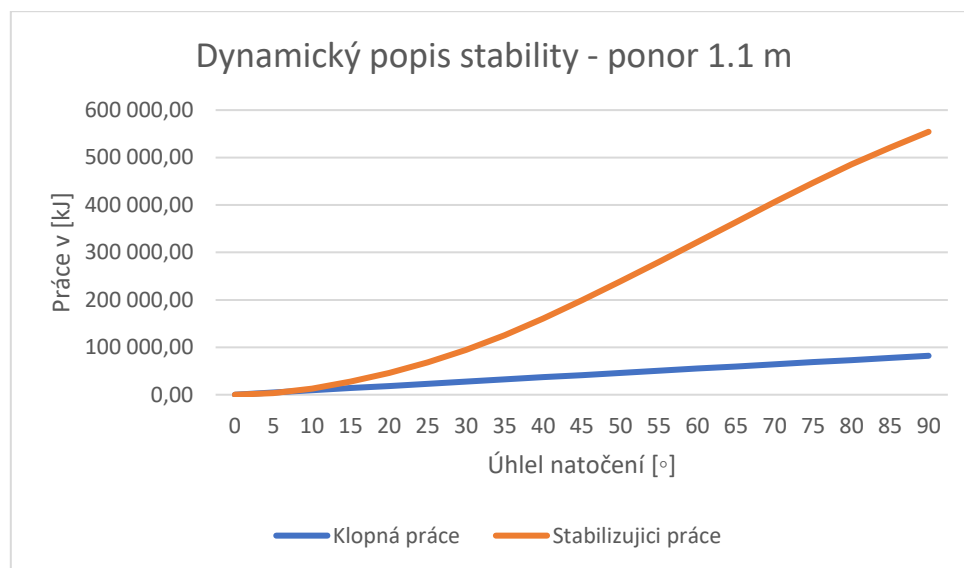
Obrázek 13 Dynamický popis stability.

Klopná práce počítána pro rychlost větru 11 m/s.



Obrázek 14 Dynamický popis stability.

Klopná práce počítána pro rychlost větru 11 m/s.



Obrázek 15 Dynamický popis stability.

Klopná práce počítána pro plochou plachet 15 m² a rychlost větru 10 m/s.

| | Natočení lodě [°] | v_m [m/s] sklopná ploutev | v_m [m/s] kyl 1.1m |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Plné plachty 23.5 m ² | 45 | 8.7 | 10.1 |
| | 70 | 9.8 | 11.6 |
| | 90 | 9.9 | 12.0 |
| 1.ref 15 m ² | 45 | 11.3 | 13.1 |
| | 70 | 12.7 | 15.1 |
| | 90 | 12.8 | 15.6 |

| | | | |
|--|----|------|------|
| 2.ref 12 m ² | 45 | 13.1 | 15.3 |
| | 70 | 14.8 | 17.6 |
| | 90 | 14.9 | 18.2 |
| Přední plachta 5 m ² | 45 | 20.7 | 24.2 |
| | 70 | 23.4 | 27.8 |
| | 90 | 23.6 | 28.7 |

Tabulka 5 Mezní rychlost větru nutnou k otočení plachetnice.

5. Rozbor bezpečnosti plachetnice

V předcházejících kapitolách jsme blíže analyzovali stabilitu plachetnice cc19. V této kapitole bychom chtěli rozebrat nakolik původní varianta cc19 odpovídá zařazení plachetnice do kategorie C (příbřežní) a jestli je možné variantu s pevným kýlem zařadit do kategorie B (plachetnice na otevřené moře).

Podle konstruktéra cc19 odpovídá tato plachetnice kategorii C, tedy plachetnici, která může plout ve vlnách do výšky 2m do celkového stupně síly větru 6. Ta podle Beaufortovi stupnice odpovídá rychlosti větru až 14 m/s viz. [16]. Podle předchozích výpočtů by cc19 mohla v takových podmínkách plout při plachtách skasaných na 12 m². Při plavbě na kosatku (případně na bouřkovou kosatku) by čistě z hlediska stability mohla plout i na mnohem silnějším větru viz. tabulka 5.

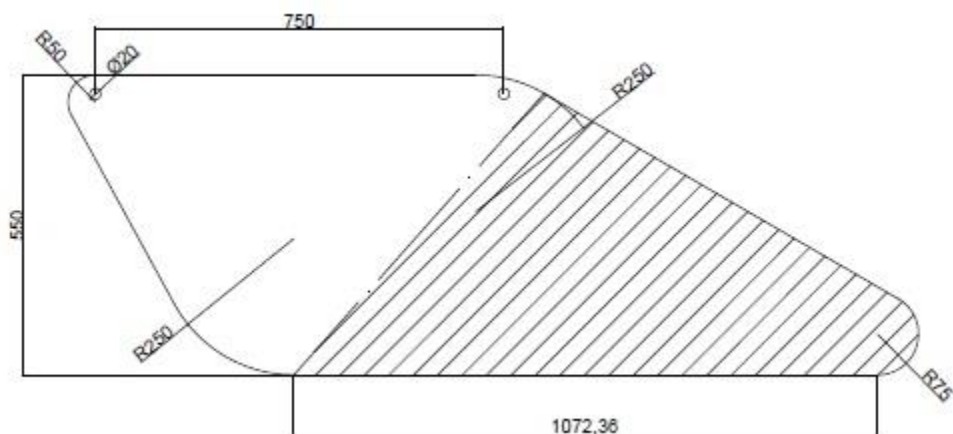
Kategorie B označuje plachetnice, které se mohou plavit na otevřeném moři. Základní omezení jsou pro kategorii B vlny do velikosti 4m a síla větru 8 označovaný jako čerstvý víchř nebo jako bouřlivá víchřice. Tomuto stupni odpovídá rychlost větru

až 21 m/s. Při takové rychlosti by i s uvažovaným kýlem o ponoru 1.1 m možné plout pouze na kosátku. Přestože čistě z hlediska stability by bylo možné verzi s kýlem označit jako kategorii B je třeba jmenovat několik dalších aspektů, které hrají při zařazení plachetnice do konkrétní kategorie roli a které je třeba brát v potaz při odhadu bezpečnosti plachetnice.

Při výpočtu stability jsme brali v potaz pouze statické účinky větru. Stejně tak jsme neuvažovali nakolik je stabilita ovlivněna vlnami. Především na moři je působení vln zcela zásadní. V práci jsme nebrali v potaz nakolik je trup odolný ve vlnách. Pro zjištění nakolik je design vhodný do náročnějších podmínek by bylo nutné přímo kontaktovat konstruktéra plachetnice. V neposlední řadě nebyla v práci uvažována situace, kdy při převržení vnikne do kokpitu případně i do kajuty voda. Voda v kokpitu a případně v kajutě je pro stabilitu zcela zásadní viz. [8]

6. Dimenzování sklopné ploutve.

Cílem této kapitoly je navrhnout alternativní variantu ke sklopné ploutvi (kýlu) u plachetnice Cape cutter 19. Původní návrh počítá s ploutví vyřezanou z nerezového plechu o tloušťce 20 mm, s celkovou váhou cca 100 kg. Na obrázku je vyšrafovanou plochou označena část ploutve, která je při sklopení pod lodí a která má vliv na stabilitu plachetnice. Tato plocha má obsah 0.4 m^2 (celková plocha ploutve je 0.67 m^2) a těžiště je přibližně 0.3 m pod lodním kýlem (celkově přibližně 0.8 m pod čarou ponoru). Nově realizovaný návrh počítá namísto nerezového profilu s profilem hliníkovým, ke kterému bude ve spodní části přidáno olovené závaží tak, aby celkový klopný moment ploutve byl stejný nebo větší než u původního designu.



Obrázek 16 Rozměry ploutve.

Vyšrafovaná část označuje plouchu, které je po sklopení ponořená.

6.1 Stanovení tlaku na ploutev

Během plavby působí na sklopnou ploutev tlakové namáhání způsobené pohybem plachetnice. Zásadní vliv má síla větru působící na plachtu (označme F_v), která nutně vyvolává odporovou sílu působící na trup loď a sklopnou ploutev. Při vyšších rychlostech tak působí na ploutev hydrodynamická síla (F_h) způsobená obtékáním ploutve vodou. Tuto sílu nebudeme brát v potaz.

Nyní stanovíme sílu, jakou vítr působí na plachetnici. Tato síla je rovna

$$F_v = \frac{1}{2} C_p \rho_v v_v^2 S_v \quad (8)$$

kde C_p je součinitel odporu plachet, ρ_v je hustota vzduchu a v_v je okamžitá rychlost větru (vzduchu) a S_v je celková plocha, na kterou vítr působí. Jedná se o základní vztah pro turbulentní proudění, který lze nalézt např. v práci Kozubkové [6].

Proti této síle působí odporová síla vody a vzduchu. Odporovou sílu vzduchu zanedbáme a budeme zde brát v potaz pouze odporovou sílu vody, kterou označíme jako F_h . V případě turbulentního proudění lze odporovou sílu vody počítat, jako

$$F_h = \frac{1}{2} C_h \rho_h v^2 S_h \quad (9)$$

kde C_h je součinitel odporu a ρ_h je hustota kapaliny a S_h je plocha na kterou kapalina působí. Symbolem v zde značíme rychlost pohybujícího se plavidla. Za oba koeficienty odporu dosadíme číslo 1. Následně stanovíme pohybovou rovnici jako:

$$m \cdot a = F_v - F_h \quad (10)$$

$$a = \frac{F_v}{m} - \frac{1}{2} \rho_h v^2 S_h \quad (11)$$

Pokud budeme považovat rychlost větru a tedy i sílu větru za konstantní, můžeme s užitím základních technik pro řešení diferenciálních rovnic stanovit velikost odporové síly vody, která působí na trup a na ploutev. Za $\frac{F_v}{m}$ dosadíme konstantu k , za $\frac{\rho_h S_h}{2m}$ dosadíme souhrnou konstantu A . Pohybová rovnice bude mít následně tvar:

$$a = k + A \cdot v^2 \quad (12)$$

Tento vztah lze s užitím separace proměnné upravit na vztah:

$$\frac{dv}{dt} = a - Av^2, \int \frac{dv}{a - Av^2} = \int dt \quad (13)$$

Upravenou pohybovou rovnici lze řešit například integrací parciálních zlomků viz. [11]. Řešením pohybové rovnice 13 je pak následující funkce:

$$v = v_m \frac{e^{2t\sqrt{a \cdot k}} - 1}{e^{2t\sqrt{a \cdot k}} + 1}, \quad (14)$$

kde v_m je mezní rychlost kterou lze vyjádřit jako $v_m = \sqrt{\frac{k}{A}}$. Z povahy rovnice 14 je zřejmé, že mezní rychlost nemůže v konečném čase nastat. Z našeho pohledu musíme vyřešit problém, za jako dlouho se odporová rychlost bude blížit mezní rychlosti. Z toho bude možné usoudit nakolik se síla větru přímo projeví na tlaku působícím na ploutev.

Při výpočtu odporové rychlosti budeme počítat s následujícími hodnotami: Za C dosadíme hodnotu 1, budeme tedy uvažovat maximální možný odpor proti bočnímu splouvání plachetnice.

Za hustotu vzduchu ρ_v dosadíme hustotu vzduchu při teplotě 0°C.

Tedy: $\rho_v = 1.25 \text{ kg/m}^3$.

Za hustotu vody ρ_h dosadíme hodnotu 1000 kg/m³.

Maximální plocha plachet u cc19 je 23.5 m² a plocha průmětu lodního trupu nad vodou je přibližně 4.5 m². Tedy celkový plocha na kterou vítr působí je $S_v = 28 \text{ [m}^2 \text{]}$.

Plocha průmětu ponořené části včetně plochy lodního trupu je přibližně 3 m² a plocha ploutve je 0.4 m². Celkem tedy je plocha na kterou působí odpor vody $S_h = 3.4 \text{ [m}^2 \text{]}$.

Za rychlost větru budeme uvažovat zcela extrémní hodnotu $v_v = 25 \text{ [m/s]}$. Poznamenejme, že při takové síle větru by téměř jistě probíhala plavba za zkasaných plachet a tedy síla větru na plachtu by byla podstatně menší.

| veličina | značka | hodnota |
|------------------------|----------|---------------------------|
| rychlost větru | v_v | 25 [m/s] |
| hmotnost cc19 | m | 1000 [kg] |
| hustota vzduchu | ρ_v | 1.25 [kg/m ³] |
| plocha plachet a trupu | S_v | 28 [m ²] |

| | | |
|-------------------------|----------|---------------------------|
| síla větru | F_v | 8750 [N] |
| zrychlení způsobené F v | k | 8.75 [m/s ²] |
| průmět ponořené části | S_h | 3.4 [m ²] |
| hustota voda | ρ_h | 1000 [kg/m ³] |
| koeficient odporu | C | 1 |
| konstanta | A | 1.7 [s ⁻¹] |
| mezní rychlost | v_m | 2.268 [m/s] |

Tabulka 6 Hodnoty pro výpočet rychlosti snosu

Nyní můžeme přistoupit k výpočtu jednotlivých hodnot, které lze dosadit do rovnice 15. Dosazované hodnoty jsou shrnuty v tabulce 7. Jak již bylo řečeno, rychlost v z matematického hlediska nikdy nedosáhne hodnoty v_m ale bude se k této hodnotě limitně blížit. My budeme zjišťovat, v jakém čase bude hodnota $\frac{v}{v_m}$ (pochopitelně $\frac{v}{v_m} \in (0,1)$) se bude blížit jedné. Úpravou rovnice 14 můžeme vyjádřit čas, pro který je dosaženo zvoleného poměru mezi mezní a aktuální rychlostí jako

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{v}{v_m} + 1}{\left(1 - \frac{v}{v_m}\right) \sqrt{A \cdot k}} \right) \quad (15)$$

Hodnoty času t pro různě zvolené rychlosti v při dosazení za $\sqrt{A \cdot k} = \sqrt{1.7 \cdot 8.75} = 3.857$

Tlak vody působící na lodní ploutev budeme počítat jako $\rho_h = \frac{1}{2} \rho_h v^2$, sílu působící na ploutev jako $F_{pl} = p_h \cdot 0.4$, kde 0.4 je plocha ponořené části ploutve. V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty časů, pro které je dosaženo zvoleného poměru $\frac{v}{v_m}$. Zdůrazněme,

že při výpočtu uvažujeme konstantní působení síly větru a to, že nedojde k natočení lodi. Jedná se tedy spíše než o přesný odhad skutečných provozních sil o odhad největšího zatížení, které by mohlo nastat. Lze předpokládat, že situace, kdy loď velkou rychlostí splouvá po větru, by netrvala příliš dlouho. Při rychlosti větru by došlo velmi rychle k naklopení lodě a tím i k výraznému snížení síly větru a tedy i tlaku na ploutev. Za odhad maximálního zatížení budeme uvažovat tlak 0.0025 [MPa]. Na tento tlak budeme následně dimenzovat jednotlivé návrhy ploutve.

| | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| poměr $\frac{v}{v_m}$ | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 0.999 |
| čas [s] | 1.22 | 1.37 | 1.54 | 1.77 | 2.15 | 2.51 | 4.48 |
| Rychlost [m/s] | 1.13 | 1.36 | 1.58 | 1.82 | 2.04 | 2.16 | 2.26 |
| tlak ρ [Pa] | 639 | 925 | 1248 | 1656 | 2081 | 2333 | 2554 |
| síla F_{pl} [N] | 256 | 370 | 499 | 662 | 832 | 933 | 1020 |

Tabulka 7 Čas nutný k dosažení poměru $\frac{v}{v_m}$.

6.2 Dimenzování lodní ploutve.

Nyní přistoupíme k samotnému určení vhodné tloušťky hliníkového profilu ploutve tak, aby ani při zatížení 2500 Pa nebylo přesáhnuto maximálního dovoleného napětí.

6.2.2 Použitý materiál

Jak již bylo řečeno, profil ploutve budeme dimenzovat z hliníkového plechu. Původní design počítal s nerezovým plechem o tloušťce 20 mm. Takto tlustý materiál byl zvolen s ohledem na celkovou stabilitu plachetnice. Z hlediska pevnosti se ovšem jednalo o zcela předimenzovanou součást. Při výpočtu jsme za mez pevnosti v tahu jsme dosadili hodnotu $E=70$ [GPa] a za poissonovo číslo $\mu=0.33$. Mez pevnosti hliníku se pohybuje v rozmezí 145-185 [MPa] [14]. My budeme brát v potaz jako dovolené napětí - σ_d hodnotu 150 [MPa]. Materiálové charakteristiky jsou shrnuty v tabulce 8.

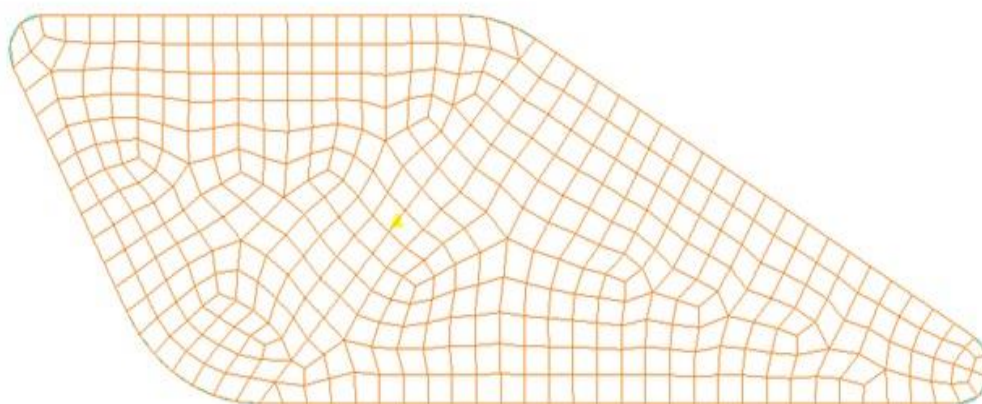
| | | | |
|---|------------|-------|--------|
| E | σ_d | μ | ρ |
|---|------------|-------|--------|

| | | | |
|-------------|-----------|------|---------------------------|
| 70000 [MPa] | 150 [MPa] | 0.33 | 2700 [kg/m ³] |
|-------------|-----------|------|---------------------------|

Tabulka 8 Materiálové charakteristiky hliníkového plechu

6.2.3 Diskretizace

Napětí a deformaci u hliníkové ploutve pro různé tloušťky plechu jsou určeny v mkp. programu Patran (verze 2017 0.1). K vysítování modelu byla využita čtvercová síť o velikosti strany elementu 40 mm s celkovým počtem uzlů 463 a s celkovým počtem elementů 416. V místě doteku ploutve se dnem lodi byla síť upravena tak, aby kopírovala přímku. Síť modelu je prezentována na obrázku 17.

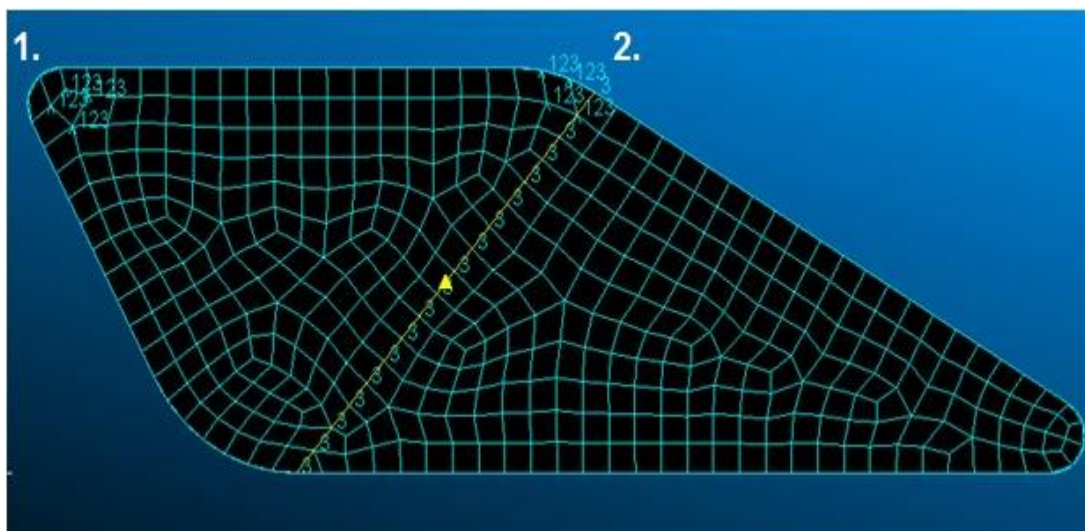


Obrázek 17 Vysítování modelu ploutve

6.2.3 Zadání okrajových podmínek

Vedle tlaku o velikost působící na oblast pod vymežující přímkou byly zadány další tři okrajové podmínky. Uzlům na přímce byl odebrán jeden stupeň volnosti ve směru osy z (kolný na plochu ploutve). V místě 1, kolem kterého se ploutev otáčí a v místě 2, kde je ploutev fixována tak, aby za plavby nedocházelo k vysouvání ploutve, byly odebrány všechny tři posuvy. Tyto okrajové podmínky byly definovány vždy pro čtyři uzly na každém místě. Takové zadání rozumně odpovídá skutečné situaci, kde je

ploutev uložena v ploutvové skříně s vůlí přibližně 5 mm. Okrajové podmínky jsou vyobrazeny na obr. 18.



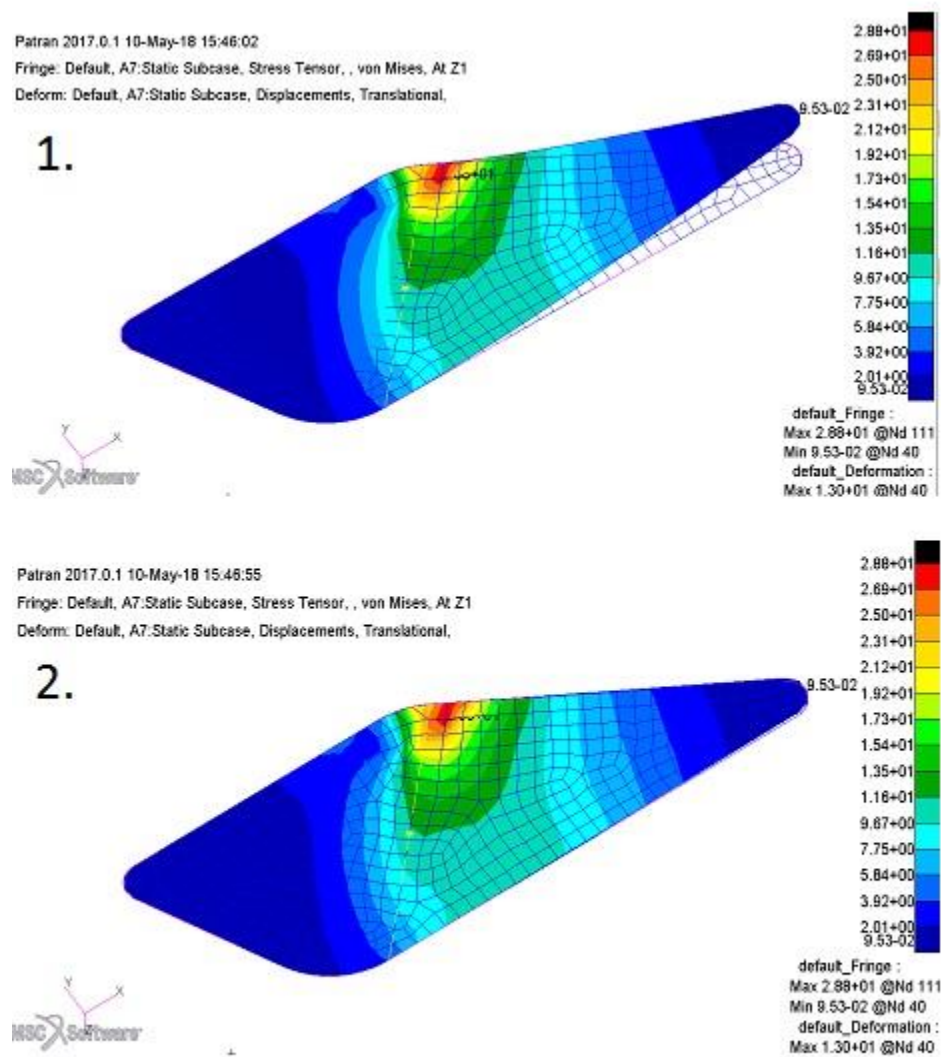
Obrázek 18 Vizualizace okrajových podmínek

6.2.4 Určení napětí a deformací.

Deformace a maximální napětí, které bylo koncentrováno v okolí bodu 2, jsou pro různé tloušťky plechu prezentovány v tabulce 9. Můžeme tvrdit, že s výjimkou tloušťky 5 mm jsou všechny ostatní profily z hlediska dimenzování pro potřeby naší úlohy dostatečné. Pokud bychom uvažovali nečekaný náraz lodní ploutve do břehu, raději bychom pro tloušťku ploutve zvolili větší tloušťku než 6 mm. Podle mínění autora této práce se za nejvhodnější jeví zvolit tloušťku 10 mm. Průhyby a deformace u plechu p otloušťce 10 mm jsou prezentovány na obrázcích.

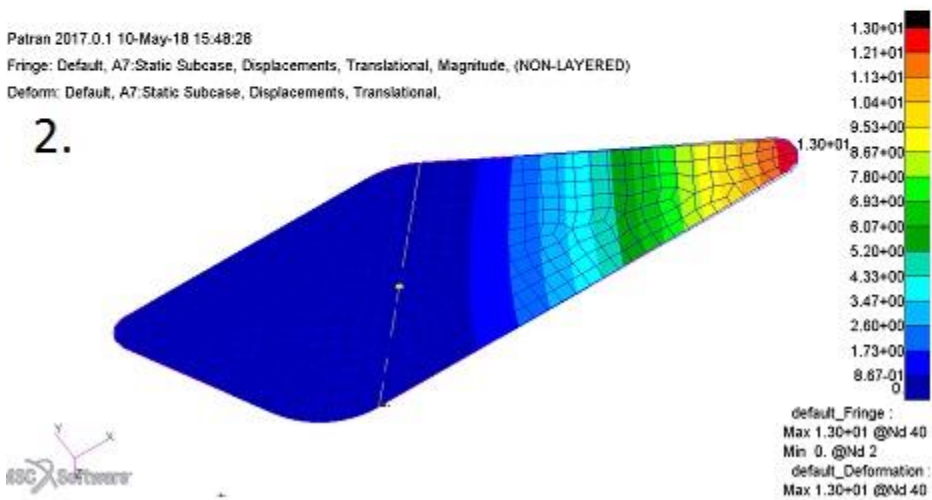
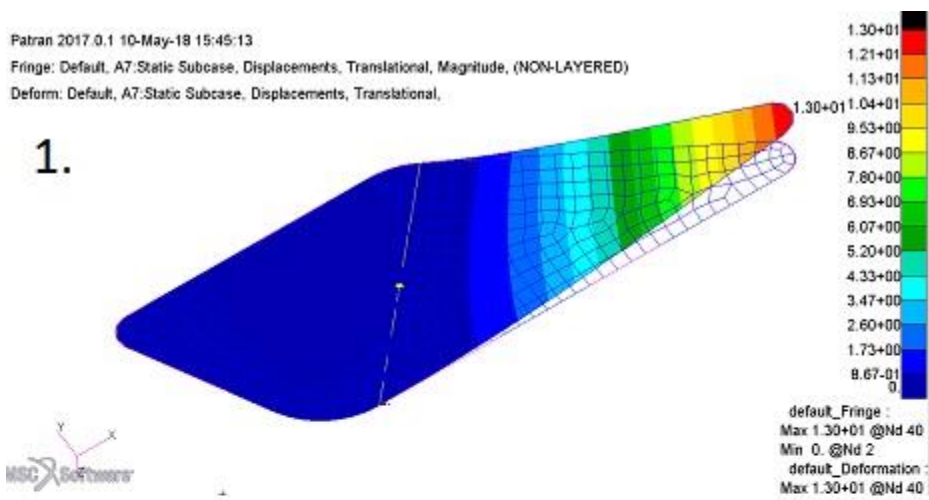
| tloušťka plechu | maximální napětí [MPa] | maximální deformace [mm] |
|-----------------|------------------------|--------------------------|
| 5 | 178 | 63 |
| 6 | 116 | 43 |
| 8 | 65.2 | 23 |
| 10 | 28.8 | 13 |

Tabulka 9 Napětí a deformace u lodní ploutve



Obrázek 19 Vizualizace Napětí u ploutve tloušťky 10mm.

1) napětí zobrazeno s měřítkem 10:1, 2) napětí zobrazena ve skutečné velikosti.



Obrázek 20 Vizualizace deformací ploutve.

1) deformace zobrazena s měřítkem 10:1.

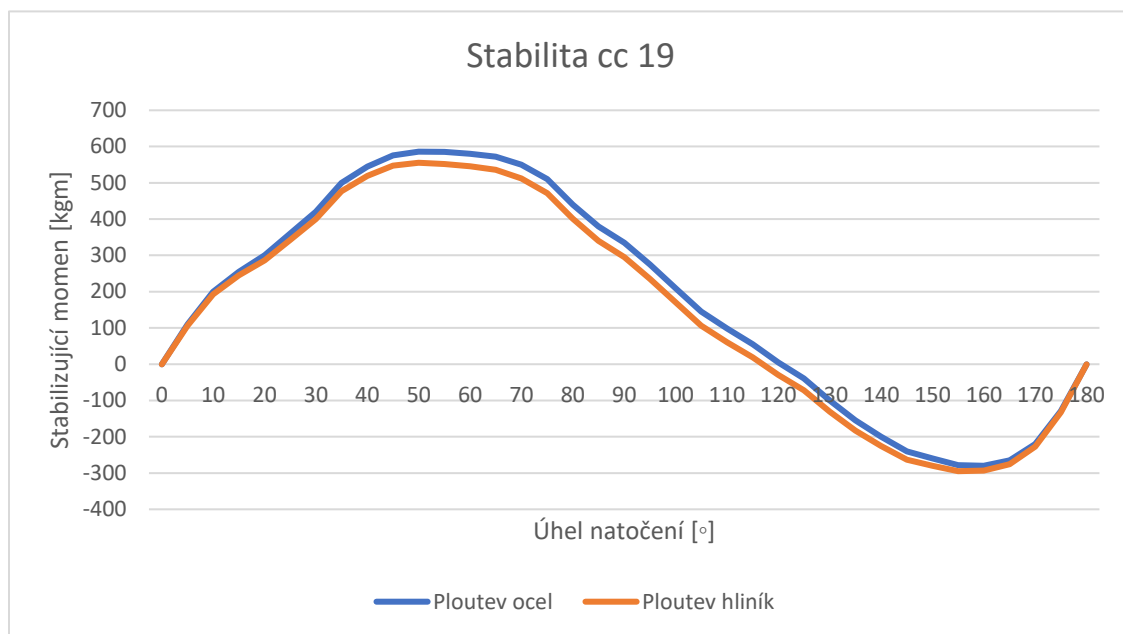
2) Deformace zobrazena ve skutečné velikosti.

6.3 Úprava designu lodní ploutve

V předchozích kapitolách byly analyzovány provozní tlaky, které mohou v extrémním případě působit na lodní ploutev. Pro určení možného tlaku byla použita diferenciální rovnice druhého řádu. Následně byl v mkp. programu Patran realizován výpočet napětí a deformací pro různé tloušťky hliníkových plechů. Na základě výstupů z Patranu lze konstatovat, že nelze použít plech o tloušťce menší než 6 mm. Také z osobních zkušeností autora lze připomenout situaci, kdy na podstatně menší plachetnici došlo k ohybu hliníkové ploutve o tloušťce 4 mm. Vzhledem k možnému zatížení ploutve při nárazu byla zvolena, jak nejvhodnější profil plech o tloušťce 10mm.

Zatímco původní hmotnost ploutve byla 100 kg. Nová ploutev z 10 mm plechu by vážila necelých 20 kg. To by zásadně usnadnilo případnou manipulaci s ploutví, a to jak při jejím sklápění, tak při případném vyjmutí z ploutvové komory. Změna stability oproti původní ploutvi je zobrazena na obrázku 21. AVS se v tomto případě snížil ze 122 na 118 stupňů. Dle obrázku 21 můžeme konstatovat, že se stabilita nijak výrazně nezmenšila.

Pokud bychom chtěli zachovat stabilitu stejnou, jako byla u ocelové ploutve bylo by možné buď zvýšit balast na dně plachetnice a nebo zvýšit hmotnost ponořené části hliníkové ploutve. V případě umístění dalšího balastu na dně lodi by bylo nutné přidat přibližně 130 kg. Oproti ocelové ploutvi by tak celková hmotnost plachetnice stoupla o zanedbatelných 50 kg. Navýšení hmotnosti ponořené části ploutve by bylo možné technicky provést připevněním ocelového nebo olověného plechu k hliníkové ploutvi. Hmotnost takto upravené ploutve by byla 70kg. V tomto případě by Celková hmotnost plachetnice klesla o 30 kg. Z těchto dvou řešení bych zvolil variantu s čistě hliníkovou ploutví a s případným navýšením balastu na dně lodě.



Obrázek 21 Srovnání stability mezi ocelovou a hliníkovou ploutví

Závěr

Cílem práce bylo blíže popsat především stabilitu plachetnice Cape Cutter 19 a z ní vyplývající bezpečnost plachetnice. K určení stability byl vytvořen skript v programu matlab, který pro různá natočení určil polohu těžiště ponořené části plachetnice. Na základě souřadnic pak bylo možné určit křivku stability. Získaný výsledek byl v podstatě totožný se stabilitou proklamovanou konstruktérem cc19 D. Dixem. Znalost stability cc19 umožnila navrhnout řešení s pevným kýlem.

Na základě křivek stability byla určena práce nutná k příčnému natočení lodě. Tato práce byla srovnána s prací, kterou koná vítr při naklápění plachetnice. Porovnání obou prací poskytlo velmi cenné informace o bezpečnosti plachetnice a o jejím možném použití na otevřeném moři. Za velmi důležitý výsledek lze považovat výpočet maximální síly větru pro různé nastavení plachet. Podle mého názoru je srovnání prací konaných větrem a stabilizujícími účinky lodě mnohem efektivnější, než pouhé určení stability případně některého z koeficientů, které posuzují bezpečnost plavidla. Na druhou stranu by bylo velmi zajímavé pokusit se celý systém modelovat diferenciální rovnicí odvozenou například od rotačního kmitání. U takové rovnice by ovšem nebylo možné přistoupit k linearizaci – nahrazení funkce sinus jejím argumentem. Zamýšlený model by se navíc zkomplikoval i o frakt, že v principu neexistuje pevná osa, kolem které by se loď v příčném naklápění otáčela.

Další z kapitol se zaměřila na dimenzování lodní ploutev, původní ploutev byla navržena z 2 cm ocelového plechu. Ten po našich propočtech může být nahrazen mnohem lehčím hliníkovým profilem o tloušťce 1 cm. Pevnostní analýza byla realizována v programu Patran. V kapitole věnované dimenzování ploutve byla navržena dvě řešení, jak zajistit stejnou stabilitu u cc19 s hliníkovou ploutví jako u varianty s původní ploutví. Dílčí závěry ohledně vlastností cc19 by šli rozšířit i na jiné podobně velké plachetnice.

Seznam použité literatury a zdrojů

1. Brendlinger, M. *Sailboat Stabilization System*. Worchester: 2014. Master Thesis. Worcester Polytecnic Institute.
Dostupné na https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-043014-175629/unrestricted/Sailboat_Stabilization_System_MQP.pdf [cit 16.5 2019]
2. Cape cutter oficiální stránky plachetnice. Dostupné na <https://www.capecutter19.com/> [cit. 16.5 2019]
3. ČSN EN ISO 12217-2 Malá plavidla – posuzování a kategorizace podle stability a plovatelnosti – Část 2: Plachetnice o délce trupu 6 m a větší. Praha, 2016.
4. Dix, D. Yacht design webové stránky konstruktéra cc19 <http://www.dixdesign.com/> [cit. datum]
5. Grygar, P. *Stabilita plavidla proti převržení*. Ostrava, 2010. Bakalářská práce. VŠB-TUO, Ostrava.
6. KOZUBKOVÁ, M. *Simulace a modelování hydraulických systémů*, VŠB-TU Ostrava, 2009, 128 s. <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/> [cit. 20.4 2018]
7. ROJAS, Luis et col. 2008. *Stability Criteria for Sailing Vessels*.
Dostupné na:
https://www.researchgate.net/publication/44956021_Stability_Criteria_for_Sailing_Vessels
8. ROYAL YACHT ASSOCIATION, 2009. *Stability and Buoyancy*, London, RYA. ISBN-13: 978-0901501745
9. Sailboats data - informace o indexech bezpečnosti:
<https://sailboatdata.com/sailboat/cape-cutter-19> [cit. 18.5 2019]
10. Státní plavební správa: Soubory otázek pro způsobilost M2015
<http://www.spspraha.cz/zkousky/otazky.asp?zp=M%202015> [cit. 27.3 2019]
11. VOLF, I., Šedivý, O., Pohyby tělesa v odporujícím prostředí. Studijní text pro řešitele FO, kat. B <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/odpor.pdf> [cit. 20.4 2019]

12. VRANA, I. 1990. *Jachting*. Praha: Olympia. ISBN 80-7033-016-3
13. WILFORD, A. 1990. *A Mathematical Model to Simulate Small Boat Behavior*. Bournemouth, Bournemouth Polytechnic.
14. Alfun katalog hliníkových plechů <http://www.alfun.cz/hlinik> [cit. 20.4 2018]
15. Wikipedie. Článek o Vendée Globe
https://en.wikipedia.org/wiki/Vend%C3%A9e_Globe#2016.E2.80.932017
[cit. 27.3. 2017].
16. Wikipedie. Článek o Beufortově stupnici:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice [cit. 17.5. 2019]

Přílohy

V příloze práce jsou prezentovány základní skripty z programu matlab, které byly využity pro určení stability. Ve skriptu stabilita je počítána samotná lodní stabilita další skripty jsou pomocné a jsou volány přímo z funkce stabilita. Funkce stabilita je prezentována pouze pro výpočet stability pro úhly v intervalu (0,90) další varianty funkce již v příloze nejsou prezentovány.

```
function [dat,prus] = prusecikS(body,p,q)
%Funkce nalezne pruseciky mezi lomenou čarou vymezenou body a
primkou ve smernicovem tvaru
% prusecikS([-2 1;-1 0;1 0; 2 1],0,0.5)
body(end+1,:)=body(1,:);
l=length(body)-1;
prus=[0 0];
dat=body;

j=1;%pocitadlo k prus
d=1; %pocitadlo k dat
for i=1:l

    x1=body(i,1);
    y1=body(i,2);
    x2=body(i+1,1);
    y2=body(i+1,2);
    p1=(y2-y1)/(x2-x1);
    q1=y1-p1*x1;

    if p1-p~=0

        t1=(q1-q)/(p-p1); %x-ova souradnice pruseciku primek ve
smernicovem tvaru.
        t2=p*t1+q;

        if t1>=x1 && t1<=x2 || t1<=x1 && t1>=x2
            prus(j,[1,2])=[t1,t2];

            dat(i+d+1:end+1,:)=dat(i+d:end,:);
            dat(i+d,:)=t1,t2;
            j=j+1;
            d=d+1;

        end
    end
end
end
function [vysl] = obs(data,P)
```

```

%funkce spocita polohu teziste a obsah objektu vymezenem body s
2d souradnicemi matice "data"
% P pomocny bod od ktereho budeme pocitat obsahy trojuhelniku
%priklad spusteni obs([-1 1;0 0;1 0; 2 1],[0.5 1])

s=length(data(:,1)); %pocet bodu (ve sloupci data)- vymezujujich
rez trupu

data=[data,zeros(s,1)]; %doplneni matice data o nulovy sloupec
%data(end+1,:)=data(1,:); %zvetseni dat o pridani prvnio radku
na konec matice
%s=s+1; %zvyseni parametru s o jedna;

P=[P,0]; %doplnenni o nulu
s=s-1;
pom=zeros(s,3);

for i=1:s
    B=(data(i,:)+data(i+1,:))./2;
    T=(2*B+P)/3; % souradnice teziste

    u=data(i,:)-P; % vektor u
    v=data(i+1,:)-P; % vektor v
    pl=norm(cross(u,v))/2; % plocha dilciho trojuhelnika

    pom(i,:)=T(1:2),pl];%prvni dva sloupce obsahuji x a y
souradnici teziste
    %treti sloupec reprezentuje obsah trojuhlenika
end

S=sum(pom(:,3)); %celkovy obsah soucet vsech obsahu
xT=sum(pom(:,1).*pom(:,3))/S;
yT=sum(pom(:,2).*pom(:,3))/S;

vysl=[xT,yT,S];

end

```

```

function [S] = stabilitaS(lod,q, uhl,t)
% funkce spocita stabilitu pro jednotlivé uhly natoceni
%lod -sousedici body vymezujujich tvar lodi.
% y=kx+q je smernicovy tvar primky reprezentujici vodni hladinu
% q vstupni vyska hladiny
% uhl vektor uhlu pro který chceme znát stability
% uhl uhly pro které spocitame sta

```

```

%t tolerance s jakou jsme chybou jsme ochotni se smirit
%> stabilitaS([-1 1;0 0;1 0; 2 1],0.5, [0:89],0.01)
l=length(uhl);
S=zeros(1,4);
obsah=-10; % prvotni obsah
d=[];
ql=q;
for i=1:l

    u=uhl(i)*pi/180; %prevod na radiany
    k=tan(u); %smernice je tangenta uhlu
    it=0;
    while obsah>=S(i,3)+S(i,3)*t || obsah<=S(i,3)-S(i,3)*t
        it=it+1;
        [dat,prus]=prusecikS(lod,k,ql);
        ld=length(dat);
        for j=1:ld
            ip=(k*dat(j,1)+ql); %prumet x-ove souradnice
            bodu dat(j,1) do primky y=kx+q.

            dat(j,2);

            if dat(j,2)<=ip %srovnani y-psilonove
souradnice bodu dat(j,2) a hodnoty ip
                d=[d;dat(j,:)];
            end
        end
        end
        m=[(prus(1,1)+prus(2,1))/2, (prus(1,2)+prus(2,2))/2];
        S(i,:)=[obs(d,m),it];
        obsah=S(1,3);
        zS=S(i,3)-obsah;
        norm(prus);
        ql=ql-zS/(norm(prus)*cos(u));
        d=[];
    end
end
end

```